

УДК 621.313.322

## **ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСИРОВАННЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЧИСЛЕ ИХ ФАЗ**

*С.С. Макаревич, Р.Н. Чуенко, кандидаты технических наук*

*e-mail: birma@ukr.net*

*Компенсированные  $m$  – фазные (при  $m=2k+1 \geq 3$ ) и однофазные ( $m=1$ ) асинхронные машины (КАМ) аналогичны по фазным обмоткам статора, выполненным по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) с электрической ёмкостью на его выходе. Выявлены особенности физических процессов КАМ, их влияние на повышение энергетической эффективности машин, особые условия принципа обратимости.*

***Ключевые слова:* асинхронный двигатель, автономный электромеханический комплекс, внутренняя ёмкостная компенсация, асинхронный генератор.**

Широко распространенные в технике трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором просты, надежны, относительно дешевы, но им присущи серьезные недостатки [1,2]. Главным из них является потребление из сети двух видов электрической энергии: активной и реактивной.

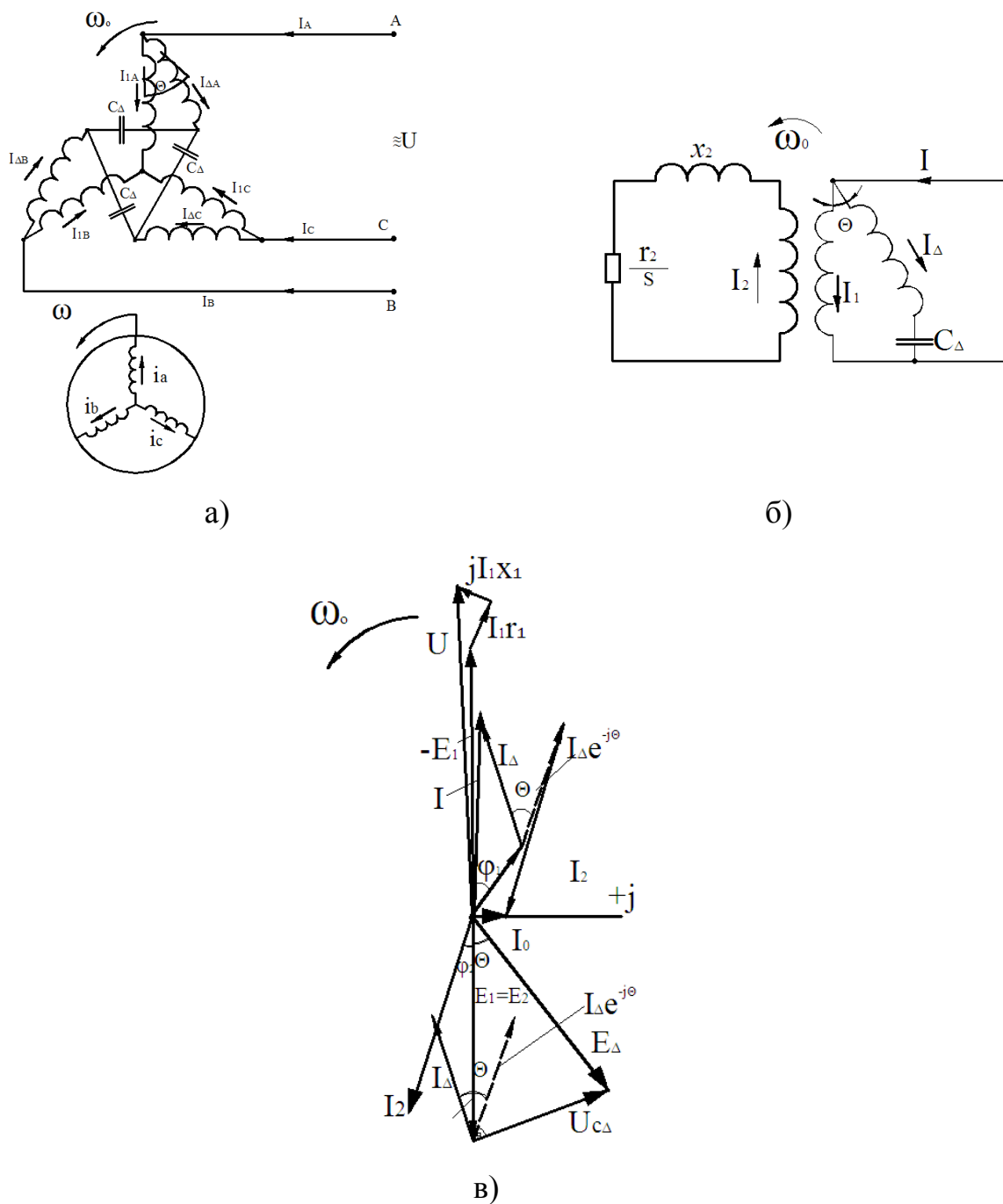
В отличие от внешней, поперечной компенсации реактивной мощности, которая практически не оказывает влияния на асинхронный двигатель, внутренняя ёмкостная компенсация изменяет его физические процессы, свойства самой машины, улучшая ее характеристики и энергетические показатели. Асинхронную машину с внутренней ёмкостной компенсацией реактивной мощности называем компенсированной (КАМ).

**Цель исследования** – проанализировать свойства асинхронной машины с внутренней ёмкостной компенсацией.

**Материалы и методы исследования.** Трехфазный компенсированный асинхронный двигатель (КАД) [4] выполнен на базе серийного асинхронного

двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором путем разделения фазной зоны  $60^\circ$  его обмотки статора на две равные части, пространственно смещенные между собой в пазах сердечника на угол  $+30^\circ$  и включенные по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) на электрическую емкость на выходе его. При этом одна из обмоток ( $W_1$ ) является основной обмоткой статора КАД и первичной обмоткой АТ. Она включается в питающую сеть с напряжением  $U$ , под действием которого при работе двигателя под нагрузкой по ней протекает, как и в обычном АД, ток  $I_1$  индуктивно-активного характера. Другая обмотка ( $W_2$ ) является дополнительной обмоткой статора КАД и вторичной обмоткой АТ, с емкостью  $C_2$  в ее цепи. Относительно основной обмотки она сдвинута в пазах сердечника статора КАД на угол  $\Theta = 30^\circ$  встречно направлению вращения со скоростью  $\omega_0$  их общего магнитного поля (рис. 1а, б). Поэтому ЭДС  $\dot{E}_2$  дополнительной обмотки опережает ЭДС  $\dot{E}_1$  основной обмотки на время  $\Delta t$  прохождения полем угла  $\Theta = \omega_0 \Delta t$ , т.е.  $\dot{E}_2 = \dot{E}_1 e^{j\Theta}$  (рис. 1, в).

Изменение пространственного положения обмоток статора по схеме поворотного АТ в асинхронной машине с вращающимся магнитным полем приводит к изменению во времени действия фазных углов их ЭДС и, следовательно, токов, напряжений без изменения ее вносимых реактивных сопротивлений. Так происходит преобразование пространственной координаты электрической величины во временную координату в электромагнитной цепи с вращающимся магнитным полем. Сочетание этого свойства обмоток статора по схеме поворотного АТ с действием электрической емкости на его выходе создает эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронной машине [4].



**Рис. 1** Принципиальная электрическая схема трёхфазного КАД (а), схема замещения его одной фазы (б) и упрощенная векторная диаграмма (в)

Трёхфазные КАД повышенной энергоэффективности рекомендуются для работы в качестве привода механизмов, требующих повышенного пускового момента, с практически постоянной нагрузкой в номинальном режиме, мощностью до (10 – 11) кВт.

Предшественником – аналогом КАД по способу выполнения фазной обмотки статора, состоящей из двух равных по числу витков частей, пространственно смещенных между собой в пазах сердечника в общем случае на угол  $\theta = \frac{90^\circ}{m}$  (при числе фаз  $m$  питающей сети), соединенных по схеме поворотного АТ на электрическую ёмкость, является однофазный конденсаторный асинхронный двигатель, известный практически со времён Н. Тесла – первооткрывателя вращающегося магнитного поля двухфазной системы токов и первого двухфазного электродвигателя.

В однофазном конденсаторном асинхронном двигателе, который при аналогии с КАД по схеме фазы обмотки статора, тоже называем компенсированным (ОКАД), при  $m = 1$  пространственный угол между двумя обмотками его статора принимают равным  $\theta = 90^\circ$ . Наличие фазосдвигающей ёмкости  $C_\Delta$  в схеме поворотного АТ, при некоторой величине ее, создает временной угол сдвига между токами  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_\Delta$  обмоток тоже равным  $90^\circ$ , что при равенстве этих токов и по величине соответствует удвоению числа фаз обмоток статора и удовлетворяет условие создания вращающегося магнитного поля двухфазной системы токов. При взаимодействии этого поля с индуктированными им токами обмотки ротора создается вращающий момент, под действием которого машина может работать в двигательном режиме. При исходном же пульсирующем магнитном поле однофазного тока момент машины был равен нулю. А в трехфазном КАД исходное магнитное поле трехфазной базовой машины уже является вращающимся. Поэтому внутренняя ёмкостная компенсация реактивной мощности в трёхфазном поворотном АТ обмоток статора с ёмкостью тоже удваивает число фаз, но это лишь улучшает спектральный состав общего магнитного поля двух совмещённых в единую систему трехфазных цепей токов, пространственно смещённых между собой, а также характеристики и энергетические показатели, увеличивает пусковой и рабочий момент КАД.

**Результаты исследования.** Аналогичны схемы фазы обмоток статора КАД и ОКАД, а также их основные физические процессы в них, что

иллюстрируют векторные диаграммы (рис.1в и 2б) соответственно при базовых числах фаз  $m = 3$  и  $m = 1$ . Расчет пусковых и рабочих характеристик КАД и ОКАД производят аналогично по единой методике по уравнениям электрического равновесия двух фаз: исходной базовой фазы статора и эквивалентной фазы приведенного ротора, в симметричном режиме установившегося или квазиустановившегося процесса. Для трехфазного КАД эта методика и некоторые результаты расчета приведены в [4].

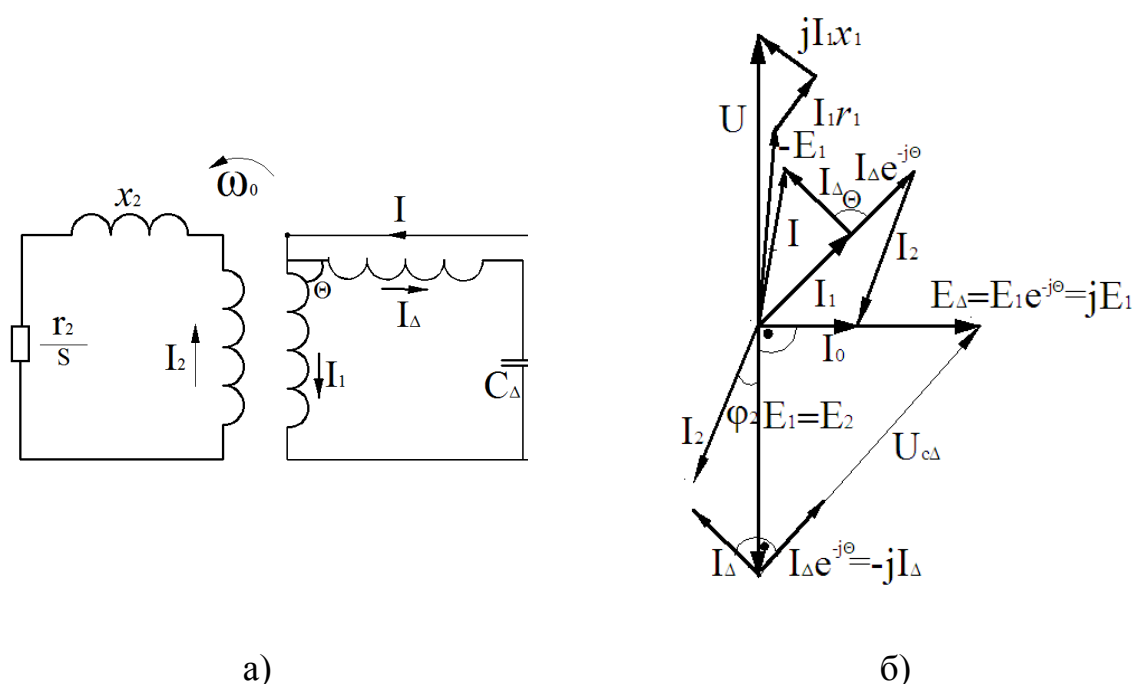


Рис. 2. Электрическая схема замещения однофазного

конденсаторного (компенсированного) асинхронного двигателя (а) и упрощенная векторная диаграмма его в номинальном режиме работы при

$$\dot{I}_{\Delta} = j\dot{I}_1$$

Компенсированная асинхронная машина, как и любая другая электрическая машина, обладает свойством обратимости, то есть может работать в режимах двигателя и генератора. Но пространственное смещение дополнительной обмотки статора относительно основной обмотки против направления вращения магнитного поля в двигательном режиме и включение обеих обмоток по схеме поворотного АТ на электрическую ёмкость обуславливают особые условия обратимости КАМ. Так при работе КАМ в

двигательном режиме и последующем повышении, за счет внешнего приводного двигателя, скорости  $\omega$  вращения ротора, при величине её больше скорости  $\omega_0$  вращения магнитного поля статора,  $\omega > \omega_0$ , как и в обычной АМ при переходе из двигательного режима в генераторный, изменяются на противоположные направления действия ЭДС  $\dot{E}_2$  обмотки ротора, активные составляющие ( $I_{2a}$ ) ее тока и, соответственно,  $I_{1a}$  тока основной обмотки статора, условно расположенных пространственно по единой основной оси машины. Реактивные же составляющие  $I_{2p}$ ,  $I_{1p}$  этих токов сохраняют прежние направления, как и ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_\Delta$  обмоток статора, которые только несколько изменяются по величине. Их разность по-прежнему создает напряжение на выходе поворотного АТ  $\dot{U}_{c\Delta} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$ , которое практически сохраняется по величине и направлению действия, как и ток вторичной обмотки АТ, равный  $\dot{I}_\Delta = \dot{U}_{c\Delta} / -jx_{c\Delta}$ . При этом токи  $\dot{I}_1$  основной обмотки и  $\dot{I}_\Delta$

дополнительной обмотки оказываются практически в противофазе, замыкаясь по контуру обеих обмоток АТ. Таким образом, при скорости ротора  $\omega > \omega_0$  КАМ оказалась в аварийном состоянии и не перешла в генераторный режим, то есть условие  $\omega > \omega_0$  является необходимым, но недостаточным для её обратимости. Для перевода КАМ из двигательного режима в генераторный, кроме создания скорости вращения ротора  $\omega > \omega_0$ , необходимо изменить на противоположное и пространственное положение дополнительной обмотки, то есть сместить её относительно основной обмотки по направлению вращения магнитного поля статора, при угле  $\theta < 0$  [5]. Такое условие можно выполнить только в неподвижном состоянии машины, отключив ее предварительно от сети. Поэтому компенсированные асинхронные генераторы предпочтительны для работы в автономном режиме (КААГ). Трёхфазные варианты их представлены в [5]. Однофазные КААГ, в связи с неизвестными ранее такими условиями их обратимости, до сего времени не применялись в технике.

На рис. 4 представлены принципиальная электрическая схема и векторная диаграмма однофазного конденсаторного(компенсированного) автономного асинхронного генератора (ОКААГ), аналогичные по схеме и векторной диаграмме фазе трехфазного КААГ по [5], но с  $\theta = -90^\circ$  при работе его на статическую переменную нагрузку с сопротивлением  $Z_n = R_n + jX_n$  и  $\cos \varphi_n = const$ . При этом внешняя, общая ёмкость  $C$  на выходе генератора служит для возбуждения его ёмкостным током и для компенсации реактивной мощности потребителя.

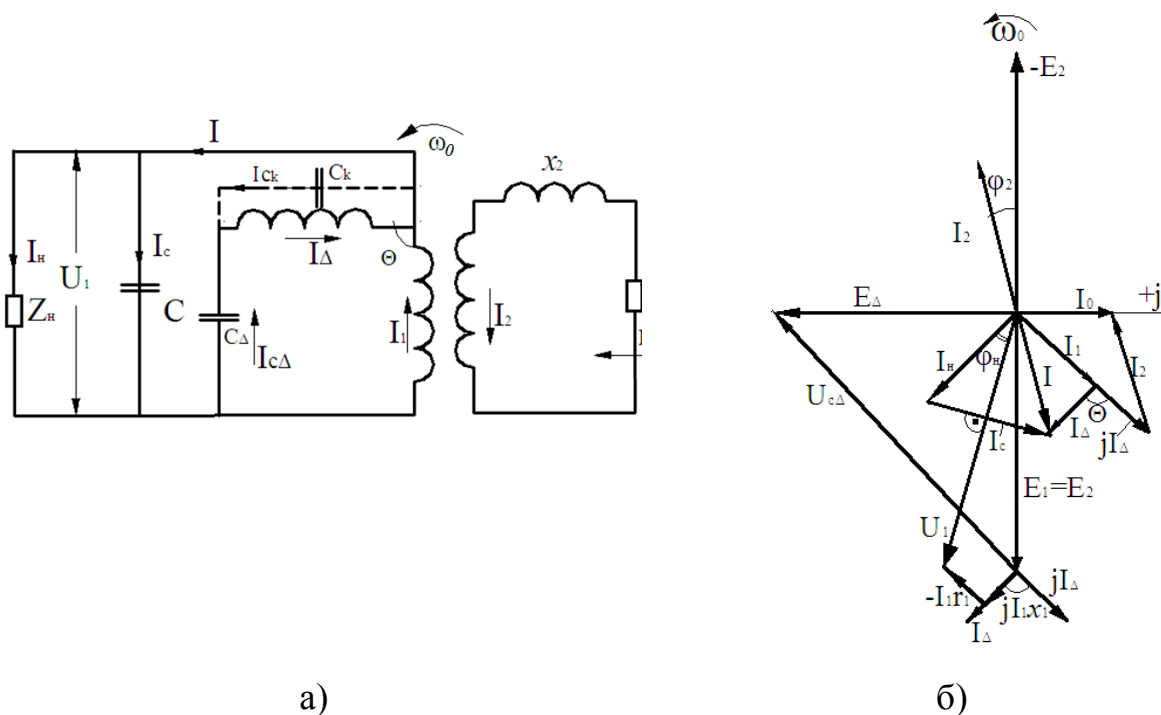


Рис. 4. Электрическая схема замещения однофазного,

компенсированного автономного асинхронного генератора (ОКААГ) (а)

при работе на статическую нагрузку  $Z_n = var$  при  $\cos \varphi_n = const$  и его

упрощенная векторная диаграмма (б)

При индуктивно-активной ( $Z_n = R_n + jX_n$ ) нагрузке ОКААГ, индуктивная составляющая тока которой частично или полностью скомпенсирована ёмкостным током  $I_c$ , ток  $I_1$  основной обмотки статора относительно напряжения  $U_1$  тоже является индуктивно – активным, а в дополнительной обмотке, с ёмкостью  $C_\Delta$  в ее ветви, действует ёмкостно – активный ток  $I_\Delta = \frac{U_{C\Delta}}{-jX_{C\Delta}}$ . При прямой электрической связи между токами обмоток АГ они

создают общий ток его  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ , близкий к фазоактивному (рис. 4б) с коэффициентом мощности генератора  $\cos \varphi \approx 1$ .

С ростом индуктивно – активной нагрузки  $Z_H$  реактивная составляющая ее тока компенсируется частью емкостного тока  $\dot{I}_C$  общей ёмкости  $C$ , что снижает поступление ее реактивной мощности на возбуждение генератора, приводя его к частичному размагничиванию и, следовательно, к уменьшению ЭДС, выходного напряжения и частоты. В обычном АГ [1, 2] они резко снижаются, что делает генератор практически неработоспособным. Но в компенсированных машинах (КААГ, ОКААГ) с ростом нагрузки увеличиваются токи обеих рабочих обмоток статора  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_\Delta$ . При этом увеличение ёмкостно – активного тока  $\dot{I}_\Delta$  вторичной цепи АГ при последовательном соединении в ней индуктивно – активной дополнительной обмотки и емкости  $C_\Delta$  приводит к некоторому повышению их напряжений  $U_\Delta$  и  $U_{C\Delta}$ . Это несколько увеличивает выработку реактивной мощности  $Q_{C\Delta} = \dot{U}_{C\Delta} \cdot \dot{I}_\Delta$  ёмкостью  $C_\Delta$ , что частично предотвращает размагничивание компенсированного генератора, повышая степень жесткости его внешней характеристики по сравнению с обычным АГ [5].

Если при этом дополнительную обмотку зашунтировать добавочной ёмкостью  $C_K$  (пунктир на рис. 4а), то ее ток  $I_{CK}$  с ростом нагрузки генератора также увеличивает выработку реактивной мощности, что добавочно подмагничивает генератор. С ростом нагрузки такого компенсированного, автономного асинхронного генератора с двойным внутренним (ёмкости  $C_\Delta$  и  $C_K$ ) и внешним ( $C$ ) ёмкостными возбуждениями [5] напряжение на выходе его и частота, при определенных значениях ёмкостей могут оставаться практически неизменными (стабильными) по величине или незначительно изменяются в заданных допустимых пределах.

### Выводы

Разделение электрических ёмкостей по отдельным ветвям, не связанным между собой условиями феррорезонанса напряжений, предотвращает



возникновение этих явлений в электрической цепи компенсированного автономного асинхронного генератора с любым числом его фаз.

Трёхфазные компенсированные автономные асинхронные генераторы могут быть достойными конкурентами синхронных генераторов в автономных энергетических установках, где впервые в технике могут успешно использоваться и однофазные компенсированные генераторы.

### **Список литературы**

1. Вольдек А. И. Электрические машин./ А. И. Вольдек // – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Копылов И. П. Электрические машины. /И. П. Копылов // – М. : Высшая школа, 2006. – 607 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник /[А. Э Кравчик., М. М. Шлаф и др.] – М. :Энергоиздат, 1982. – 504с.
4. Мишин В. И. Эффект внутренней ёмкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / В. И.Мишин, Р. Н. Чуенко, В. В. Гаврилюк// Электротехника. – 2009. – №8 – С. 30–36.
5. Мишин В. И. Автономный асинхронный генератор с внутренним ёмкостным возбуждением / В. И. Мишин, В.В. Каплун, С. С. Макаревич // Электротехника. – 2011. – № 3. – С. 20–26.

## **ОСОБЛИВОСТІ КОМПЕНСУВАНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН ПРИ РІЗНІЙ КІЛЬКОСТІ ЇХ ФАЗ**

***С.С. Макаревич, Р.М. Чуєнко***

*Компенсовані  $m$  - фазні (при  $m = 2k + 1 \geq 3$ ) та однофазні ( $m = 1$ ) асинхронні машини (КАМ) аналогічні по фазних обмотках статора, виконані за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) з електричною ємністю на виході. Встановлено особливості фізичних процесів КАМ, їх вплив на підвищення енергетичної ефективності машин, особливі умови принципу оберненості.*

***Ключові слова: асинхронний двигун, автономний електромеханічний комплекс, внутрішня ємнісна компенсація, асинхронний генератор***

## ***FEATURES COMPENSATED ASYNCHRONOUS MACHINES WITH A DIFFERENT NUMBER OF THEIR PHASES***

***S. Makarevich, R. Chuenko***

*Compensated  $m$  - phase (with  $m = 2k + 1 \geq 3$ ) and single-phase ( $m = 1$ ) are similar in phase stator windings. Under the scheme rotary autotransformer (AT) from the capacitance at the output were made. The physical processes capacitance induction machines, energy efficiency and special terms of the principle of reversibility were detected.*

***Keywords: induction motor, autonomous electromechanical complex, internal capacitance compensation, asynchronous generator***